

УДК 622.235.53

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЙ ВЗРЫВА НА БОЛЬШОЙ ГЛУБИНЕ

© 2024 г. А. М. Будков, Г. Г. Кочарян*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: kocharyan.gg@idg.ras.ru*

В статье приведены результаты расчета механического и сейсмического действий подземных ядерных взрывов, проведенных на глубине более километра. Проводится сравнение результатов моделирования, проведенного с учетом действия литостатического давления, с данными регистрации параметров сейсмовзрывных волн при известных экспериментах на о. Амчитка (США): «Cannikin» (глубина расположения заряда $H = 1791$ м) и «Milrow» ($H = 1219$ м). Кроме того, выполнены расчеты максимальных значений относительного коэффициента изменения проницаемости горного массива в ближней зоне взрыва. Показано, что применяемые при численном моделировании механического и сейсмического действий взрыва методы удовлетворительно описывают параметры сейсмовзрывных волн и конфигурацию зоны нарушенного взрывом материала. При этом результаты расчета не несут количественной информации о степени повреждения массива и изменении его интегральных свойств. Тем не менее, использование установленных ранее корреляционных зависимостей позволяет оценить такие свойства как поствзрывные: проницаемость, скорость распространения колебаний, степень раскрытия образовавшихся трещин и т.д. Результаты таких оценок могут быть использованы в качестве исходных данных при моделировании целого ряда физических задач.

Ключевые слова: подземный взрыв, численное моделирование, разрушение горных пород, поствзрывная проницаемость.

Для цитирования: Будков А.М., Кочарян Г.Г. Численное моделирование механического и сейсмического действий взрыва на большой глубине // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 2. С. 11–21. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_2_11

Введение

Необходимость прогнозирования параметров движения среды при проведении крупных подземных взрывов стимулировала в 60–90-е годы прошлого века интенсивное развитие методов численного моделирования механического и сейсмического действий подземного взрыва. Были разработаны физические и математические модели, которые легли в основу численных методик решения радиационно-газодинамических и упругопластических задач о механическом действии взрыва на грунт [Архипов и др., 2002]. В разработанных вычислительных программах система уравнений, описывающих движение среды, замыкается соотношениями, определяющими связь между напряжениями и деформациями материала. Конкретный вид этих соотношений зависит от используемых моделей деформирования материала в области упругопластических нагрузок и уравнений состояния среды при высоких термодинамических параметрах. Используемый при построении уравнений состояния отдельных компонентов грунта интерполяционный подход, дает возможность охватить практически весь интересующий диапазон изменения параметров [Замышляев, Евтерев, 1990].

Под моделью деформирования грунтовой среды в области упругопластических нагрузок понимается совокупность уравнения состояния и способа задания входящих в него опорных зависимостей и констант. Для численного моделирования процессов деформирования и разрушения различных типов горных пород разработаны разные модели [Замышляев, Евтерев, 1990].

Обобщенная квазиупругопластическая (ОКУП) модель, используемая для описания процесса деформирования скальной породы, учитывает релаксацию сдвиговых напряжений при разрушении,

эффекты дилатансии в зоне сдвигового разрушения и релаксационный механизм деформирования скальной породы за пределами этой зоны (квазиупругое деформирование). При численном моделировании взрывов в массивах осадочных пород используется упругопластическая релаксационная (УПР) модель, в которой учитываются вязкие свойства среды. Вязкоупругая дилатансионная (ВУД) модель относится к наиболее полным моделям деформирования, используемых при численном моделировании воздействия интенсивных динамических нагрузок на полускальные грунты. В этой модели учитываются такие особенности деформирования полускальных грунтов, как наличие вязкоупругого участка при всестороннем сжатии ниже предела прочности, а также вязкоупругой составляющей тензора деформации (деформации последствий), зависимости траекторий сдвигового и объемного деформирования в допредельном и запредельном состояниях от скорости приложения и снятия нагрузки, необратимого объемного уплотнения грунта при всестороннем равномерном сжатии выше предела прочности, потери прочности грунта при разрушении его структуры в результате сжатия и сдвига; возникновение дилатансионных эффектов при сдвиговом разрушении. Для изучения откольных явлений в скальных массивах ОКУП и ВУД модели дополнены алгоритмом разрушения породы отрывом [Будков, Кочарян, 2024б].

Использование в расчетах разработанных моделей позволяет получить согласующиеся с опытными данными параметры движения грунта, а также размеры зон разрушения, размеры полости (глубину воронки выброса) и суммарный объем пустот [Архипов и др., 2002].

Несмотря на успехи численного моделирования, нельзя не отметить ряд нерешенных до сих пор проблем. Так, например, значительную трудность представляет описание процесса сдвигового деформирования разломов и крупных трещин. При взрыве, помимо вклада в общую динамику движения породы, межблоковые подвижки могут оказать решающее влияние на поствзрывные характеристики массива. Сложная структура массива горных пород, его дискретность, наличие нарушений сплошности на разных иерархических уровнях не позволяет достоверно судить о том, как именно изменяются свойства массива при превышении какого-либо критерия прочности геоматериала. Результаты измерений «*in situ*» показывают, что свойства собственно геоматериала изменяются в весьма ограниченной зоне сверхинтенсивных воздействий. В тоже время характеристики массива меняются при воздействиях значительно меньшей интенсивности [Кочарян, Спивак, 2003].

В недавних работах [Будков и др., 2023; Будков, Кочарян, 2024а] был использован подход, в котором для оценки степени поврежденности были использованы корреляционные зависимости между интенсивностью деформации сдвига и изменением таких характеристик массива, как скорость распространения продольных волн, степень трещиноватости и коэффициент проницаемости.

В настоящей статье мы применяем разработанные методики численного моделирования для расчета параметров сейсмовзрывных волн и характеристик скального грунта в зонах разрушения для подземного взрыва, проведенного на значительной глубине, на примере известных ядерных взрывов США: эксперимент «*Cannikin*» (мощность $Q = 5$ Мт, глубина расположения заряда $H = 1791$ м) и эксперимент «*Milrow*» ($Q = 1$ Мт, $H = 1219$ м).

Постановка расчета

При численном моделировании подземных взрывов на больших глубинах необходимо учитывать влияние тектонических и литостатических напряжений в скальном массиве. Для задания начального распределения напряжений был разработан универсальный подход, заключающийся в проведении предварительного расчета задачи на установление напряжений. Этот подход позволяет воспроизводить известное распределение начальных тектонических напряжений в расчетной области, а также учитывать искажение поля литостатических напряжений при наличии локальных неоднородностей (горных выработок или геоструктурных нарушений). В случае отсутствия данных о полях тектонических напряжений и локальных неоднородностей приемлем существенно более простой подход, основанный на использовании аналитических соотношений, полученных для плоскодеформированного твердого тела.

Всю процедуру подготовки и проведения расчетов с помощью численных методик [Архипов и др., 2002] проиллюстрируем на примере численного моделирования параметров сейсмозрывных волн и характеристик скального грунта в зонах разрушения для двух подземных ядерных взрывов, проведенных на о. Амчитка (архипелаг Алеутские острова): взрыв мощностью 5 Мт на глубине 1791 м (эксперимент «*Cannikin*») и взрыв мощностью 1 Мт на глубине 1219 м (эксперимент «*Milrow*»).

На основании анализа исходных данных [Perret, 1972], задавались скорость распространения продольных волн c_p и плотность грунта ρ_0 в районе проведения экспериментов «*Cannikin*» и «*Milrow*». При численном моделировании использовалась слоистая модель скального массива, включающая шесть однородных горизонтальных слоев (таблица 1, столбцы 1, 2). Далее производилось доопределение численных значений остальных параметров моделей на основе корреляционных соотношений между физико-механическими характеристиками грунтовых сред [Замышляев, Евтерев, 1990].

Таблица 1.

Основные константы ОКУП модели скальной породы

z , м	c_p , км/с	ρ_0 , г/см ³	ν	K_{st} , ГПа	γ_K	γ_G	E_{ss} , МПа	Y_{01} , МПа	Y_{PL} , МПа	P_B , МПа
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0–30	2.9	2.3	0.32	7.81	0.23	0.23	2.8	34.7	432	648
30–150	3.2	2.4	0.32	9.94	0.3	0.29	3.1	40.1	499	748
150–460	3.5	2.5	0.32	12.4	0.37	0.36	3.6	45.9	572	858
460–760	3.8	2.6	0.32	15.2	0.46	0.45	4.1	52.3	652	978
760–2000	4.1	2.65	0.32	18.0	0.54	0.53	4.6	59.3	739	1108
> 2000	5.4	2.7	0.32	31.8	0.95	0.93	7.4	95.5	1189	1783

Примечание: $\mu = 1$, $\varepsilon_{00} = -0.05$, $g_K = g_G = 1.6$

Скальная порода в расчете описывается с помощью ОКУП модели. В ОКУП модели критерий сдвигового разрушения породы представляет собой обобщенное условие Мизеса, которое имеет вид:

$$s_{ij}s_{ij} / 2 = Y^2(P) / 3. \quad (1)$$

В соотношении (1) $s_{ij}s_{ij}$ – компоненты девиатора тензора напряжений, P – давление. Для определения значения прочности $Y(P)$ задаются две кривые: $Y_1(P)$ – для исходного грунта и $Y_2(P)$ – разрушенной породы:

$$Y_1(P) = Y_{01} + \frac{\mu_1 P}{1 + \mu_1 P / (Y_{PL} - Y_{01})}, \quad (2)$$

$$Y_2(P) = \begin{cases} Y_{02} + \mu_2 P & P < P_B, \\ Y_1(P) & P > P_B. \end{cases}$$

Здесь Y_{0i} , Y_{PL} – играют роль сцепления грунта и предельного значения сдвиговой прочности, μ_i – коэффициенты трения, P_B – параметр, $\mu_2 = (Y_1(P_B) - Y_{02}) / P_B$.

Для описания объемного деформирования грунта на плоскости $\{P - \varepsilon\}$, где $\varepsilon = 1 - \rho_0/\rho$ – объемная деформация, задаются диаграммы динамического $P_d(\varepsilon)$ и статического $P_{st}(\varepsilon)$ сжатия и кривая предельного разрыхления $P_L(\varepsilon)$.

Существенной составной частью обобщенной квазиупругопластической модели являются соотношения, позволяющие описать диссипативные процессы в скальной породе при неразрушающей нагрузке, то есть нагрузке, при которой не происходит значительной пластической деформации (квазиупругая модель).

Используемые в расчетах константы ОКУП модели приведены в таблице 1. Здесь z – глубина; c_p , ρ_0 , ν – скорость продольных волн, плотность и коэффициент Пуассона; K_{st} – начальный модуль объемного сжатия на статической диаграмме; γ_K , γ_G , g_K , g_G – константы квазиупругой модели; E_{ss} – прочность породы на отрыв; ε_{00} – величина предельного разуплотнения. Все обозначения в таблице 1 соответствуют обозначениям, принятым в работе [Замышляев, Евтерев, 1990].

Моделируемые подземные взрывы являются камуфлетными. При камуфлетном взрыве не происходит раскрытия грунтового купола и отсутствует прямой выход продуктов взрыва в атмосферу. Однако объекты на поверхности скального массива вблизи эпицентра взрыва и даже на удалении от эпицентра в несколько километров могут подвергаться достаточно интенсивному сейсмическому воздействию. Кроме того, возможен выход радиоактивных продуктов взрыва в атмосферу в результате фильтрации через разрушенную взрывом скальную породу. В настоящей статье при анализе результатов численного моделирования основное внимание уделяется именно этим процессам.

Результаты расчета

На рис. 1 линиями приведены полученные в расчетах зависимости максимальных значений вертикальной и горизонтальной составляющих скорости движения грунта для эксперимента «Cannikin», а на рис. 2 аналогичные зависимости для эксперимента «Milrow». Здесь же значками представлены результаты измерений параметров колебаний на поверхности массива в экспериментах [Perret, 1972]. Рассчитанные и измеренные в эксперименте значения смещения дневной поверхности представлены на рис. 3.

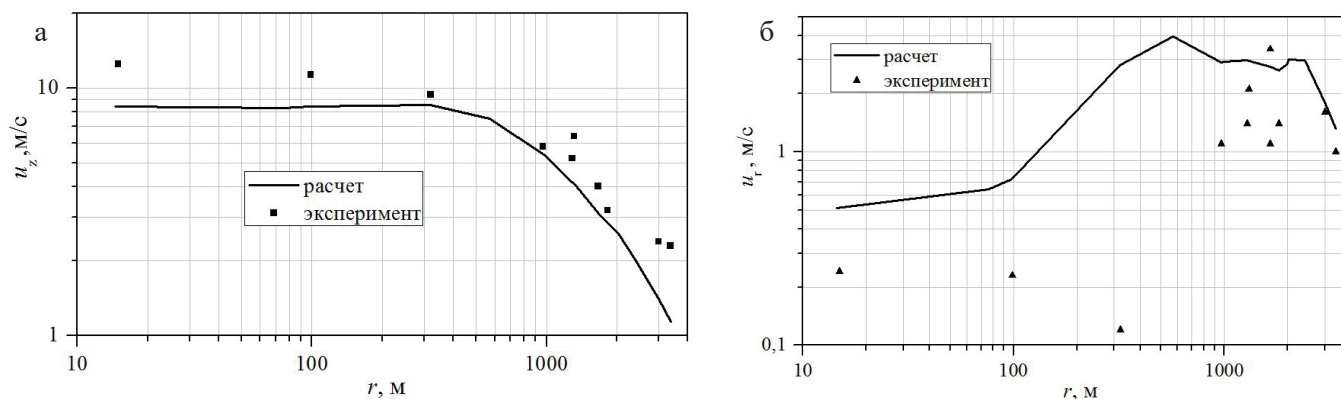


Рис. 1. Зависимость максимальных значений вертикальной (а) и горизонтальной (б) составляющей скорости движения грунта на поверхности массива от эпицентрального расстояния. Эксперимент «Cannikin»

В целом результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными. Наибольшие различия наблюдаются по амплитуде горизонтальной составляющей скорости вблизи эпицентра, что, возможно, объясняется недостаточным объемом исходных данных о физико-механических свойствах пород, слагающих массив и, как следствие, довольно грубой схематизацией в расчетах структуры массива в приповерхностной зоне.

Важно подчеркнуть, что результаты численного моделирования неплохо описывают не только максимальные значения параметров движения, но и форму колебаний даже в ближней зоне взрыва.

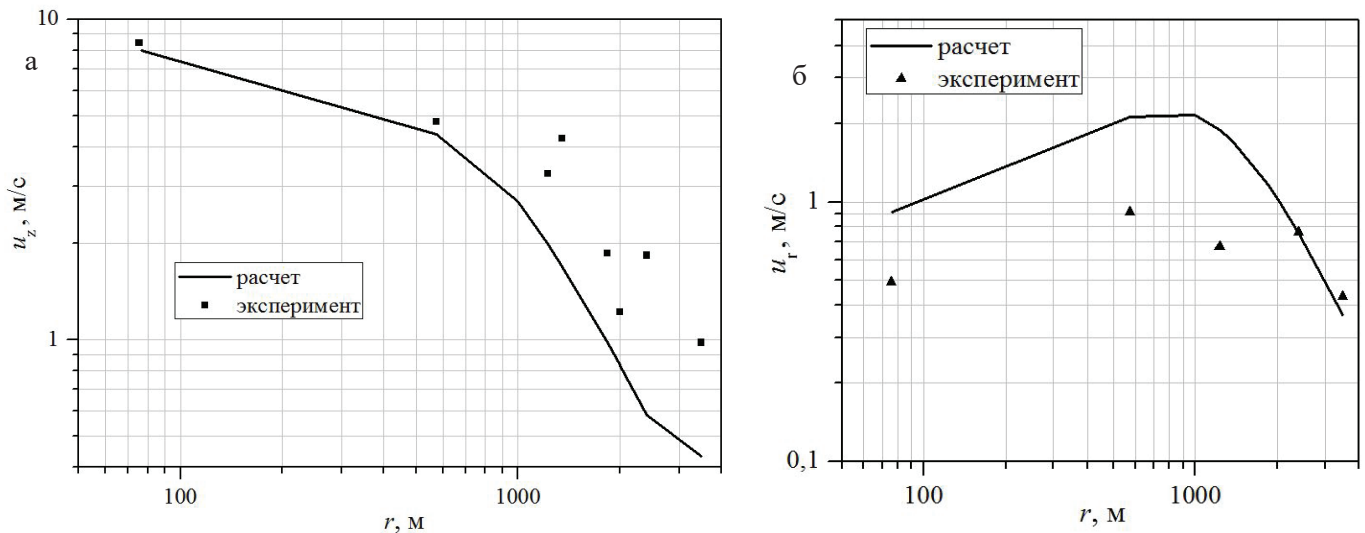


Рис. 2. Зависимость максимальных значений вертикальной (а) и горизонтальной (б) составляющей скорости движения грунта на поверхности массива от эпицентрального расстояния. Эксперимент «Milrow»

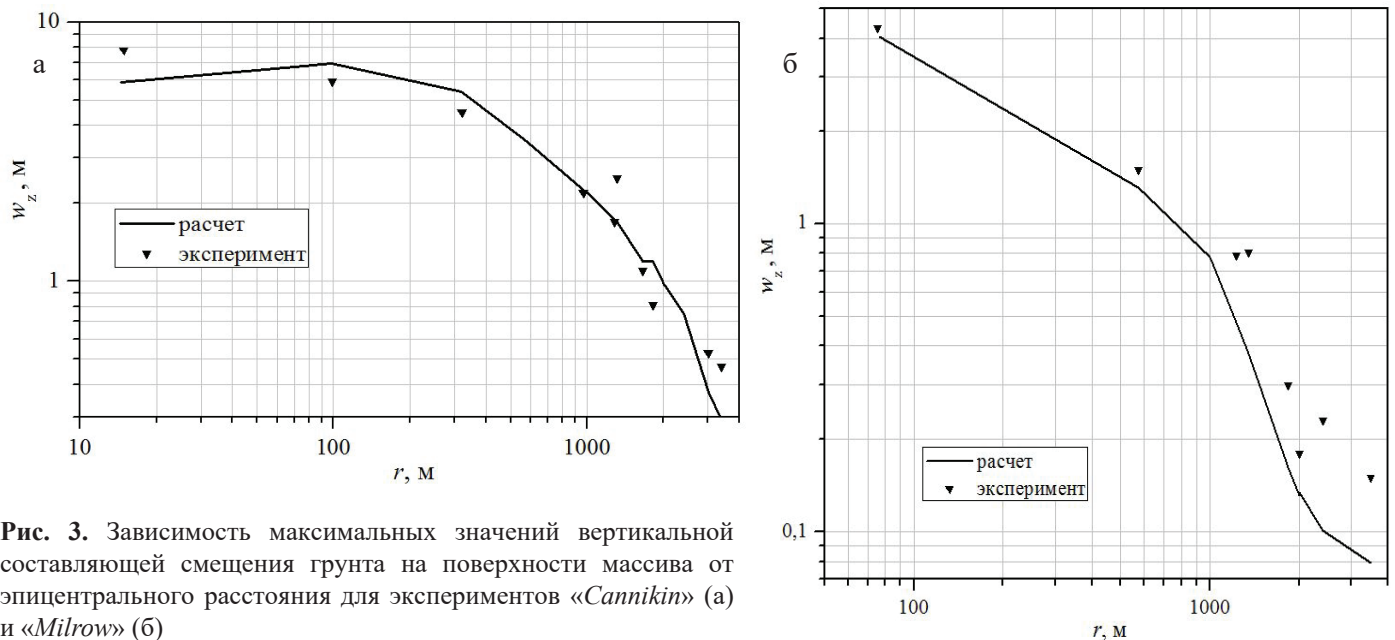


Рис. 3. Зависимость максимальных значений вертикальной составляющей смещения грунта на поверхности массива от эпицентрального расстояния для экспериментов «Cannikin» (а) и «Milrow» (б)

На рис. 4 сопоставлены полученные в расчетах и экспериментах [Perret, 1972] эпюры вертикальной составляющей скорости движения грунта в нескольких точках на поверхности массива. Хорошо видно, что волновые формы имеют вид типичный для движения грунта в зоне откола. После достижения максимальной скорости грунт тормозится с ускорением, соответствующим ускорению силы тяжести.

Интенсивное сейсмическое воздействие (~ 10 м/с вблизи эпицентра) приводит к возникновению в приповерхностной зоне скального массива откольных явлений. Расчетная конфигурация зоны разрушения скального массива при взрыве «Cannikin» показана на рис. 5. Черным цветом обозначена зона разрушения сдвигом, коричневым – области, где реализуется разрушение и сдвигом, и отрывом, другими цветами – зоны трещин отрыва различной ориентации. Согласно расчетным данным, сеть трещин отрыва соединяет зону дробления с дневной поверхностью скального массива и, на первый взгляд, может служить каналом для выхода продуктов взрыва из котловой полости в атмосферу.

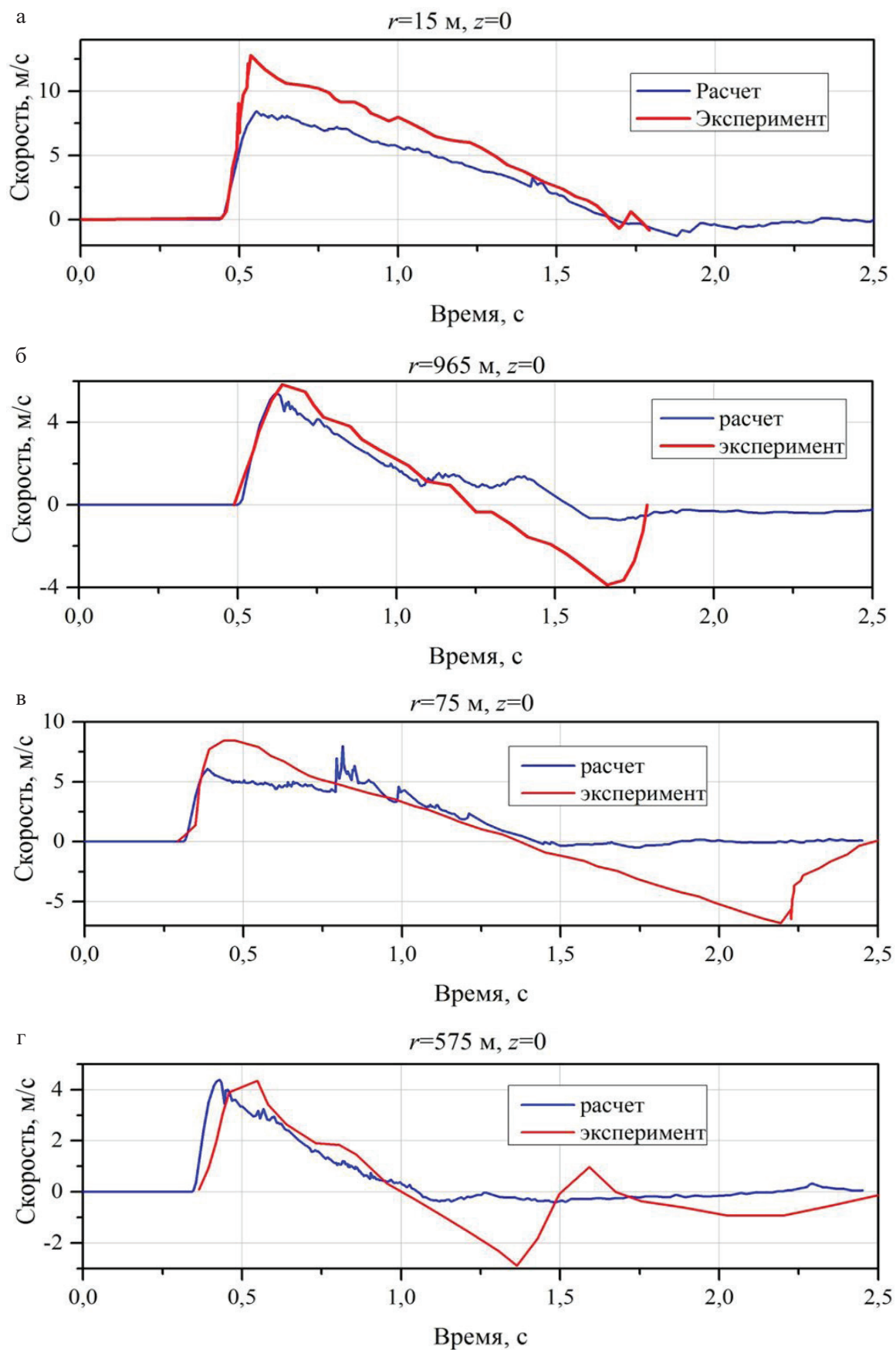


Рис. 4. Рассчитанные и зарегистрированные в эксперименте эпюры вертикальной составляющей скорости движения поверхности в экспериментах «Cannikin» (а, б) и «Milrow» (в, г)

Однако данные рис. 5 лишь фиксируют в различных точках массива факт превышения уровнем нагрузок предела прочности скальной породы на сдвиг или растяжение и не несут информации о степени раскрытия образовавшихся трещин.

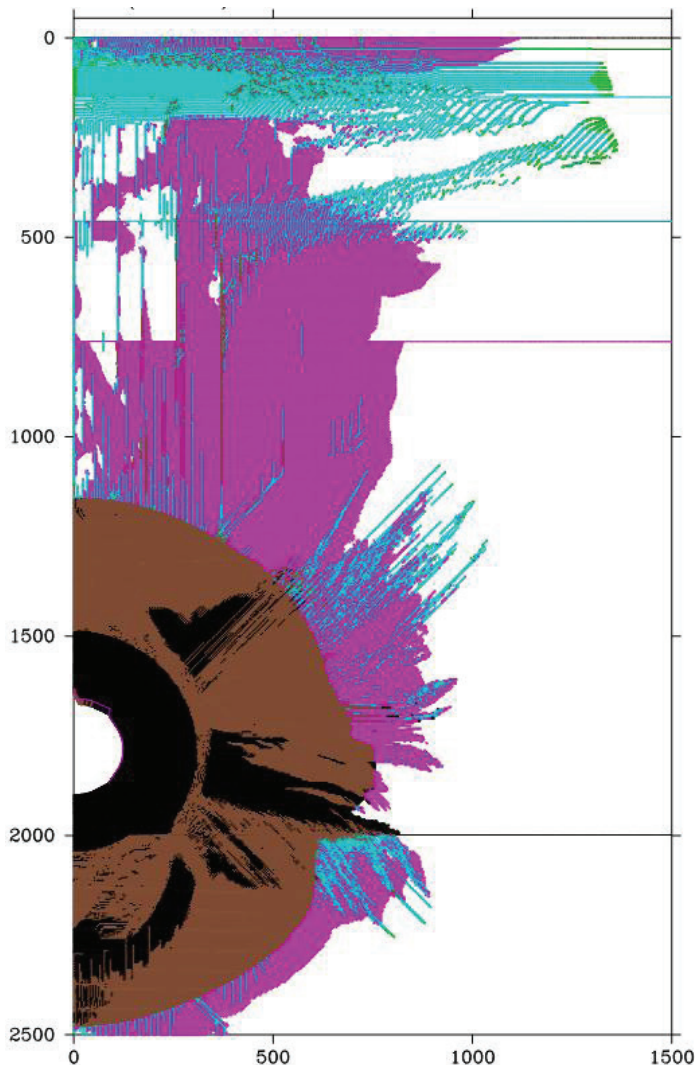


Рис. 5. Конфигурация зоны разрушения скального массива. Эксперимент «Cannikin»

Оценка степени нарушенности породы в зонах разрушения и особенно прогнозирование степени изменения фильтрационных характеристик породы в этих зонах представляет значительную трудность. Проведенный анализ показал, что удобным параметром для таких оценок является величина второго инварианта девиатора тензора деформаций:

$$J_2 = (1/6)[(e_1 - e_2)^2 + (e_1 - e_3)^2 + (e_2 - e_3)^2], \quad (3)$$

где e_1, e_2, e_3 – главные компоненты тензора деформаций. Неотрицательная величина

$$S = 2\sqrt{J_2} \quad (4)$$

называется интенсивностью деформации сдвига или просто сдвигом. В случае чистого сдвига величина S равна деформации сдвига. При этом величина возможного дилатансионного разуплотнения в первом приближении прямо пропорциональна деформации сдвига [Качанов, 1990]. Таким образом, для небольших разуплотнений величина S и линейный коэффициент дилатансии позволяют оценивать степень разуплотнения. В случае одноосного растяжения величина S , пропорциональная разности главных деформаций, дает качественное представление о возможной степени раскрытия трещин отрыва.

Используемая для проведения расчетов вычислительная программа была дополнена блоком, который позволяет анализировать динамику изменения в различных точках массива величин J_2 и S , а также пространственные распределения максимальных значений этих параметров.

В работе [Будков и др., 2023] было показано, что поствзрывную проницаемость массива скальных пород можно оценить с приемлемой точностью, используя результаты расчета интенсивности деформации сдвига S . Определено соотношение, связывающее интенсивность деформации сдвига S и относительное изменение коэффициента проницаемости (отношение коэффициентов проницаемости после взрыва (k) и до взрыва (k_0)) горного массива при импульсном динамическом воздействии:

$$\eta = k/k_0 = \chi S, \quad (5)$$

где χ , вообще говоря, зависит от начальных характеристик скальной породы и для прочных скальных массивов ($c_p \sim 4000\text{--}5500$ м/с) $\chi = 500\text{--}50$.

Это соотношение позволяет сделать оценку изменения проницаемости породы на основании расчетных данных. Соответственно, результаты численного моделирования упругопластической стадии подземного ядерного взрыва могут быть использованы в качестве исходных данных при моделировании процесса фильтрации продуктов взрыва из котловой полости в атмосферу через разрушенную взрывом породу.

Полученное в результате численного моделирования подземного взрыва «Cannikin» пространственное распределение максимальных значений коэффициента изменения относительной проницаемости породы показано на рис. 6.

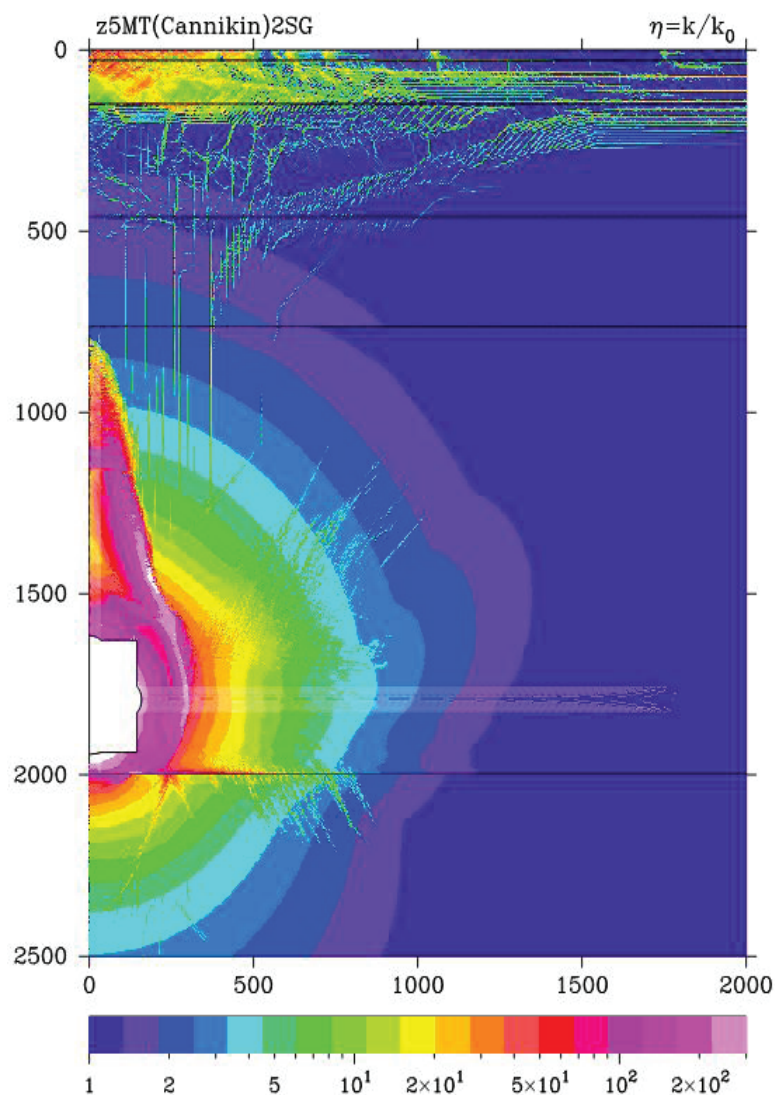


Рис. 6. Пространственное распределение максимальных значений коэффициента изменения относительной проницаемости горного массива в ближней зоне взрыва. Эксперимент «Cannikin»

Следует подчеркнуть, что проведенный расчет не учитывает наличия в массиве структурных неоднородностей – разломов и трещин. В той зоне, где развито разрушение отрывом, раскрытие существующих трещин может привести к возникновению единичных высокопроницаемых каналов. Пример такой раскрытой трещины длиной, по крайней мере, более 20 м приведен на рис. 7.

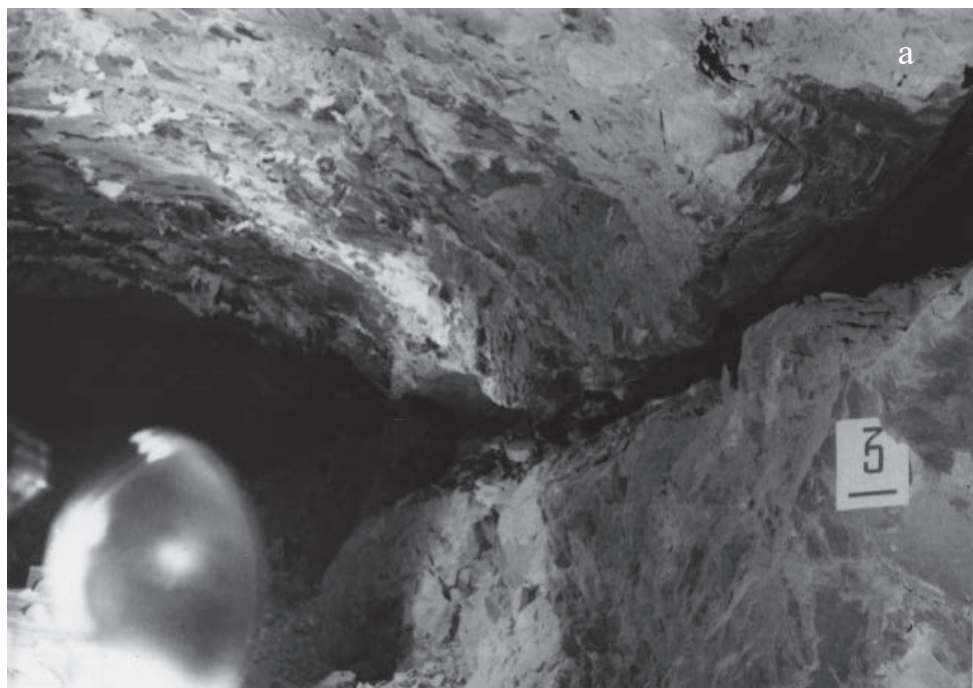


Рис. 7. Раскрытие тектонической трещины в стене штольни в результате подземного взрыва: а – пикет ПК105 м, б – ПК127 м. Глубина от дневной поверхности около 150 м. Величина максимальной скорости смещения грунта ~18–25 м/с

Выводы

Использование при численном моделировании механического и сейсмического действий взрыва ОКУП модели позволяет удовлетворительно описать параметры сейсмовзрывных волн и конфигурацию зоны нарушенного взрывом материала. При этом, результаты расчета не позволяют достоверно судить о степени повреждения и, тем более, об изменении физико-механических свойств породы и

интегральных свойств массива горных пород. Расчет величины второго инварианта девиатора тензора деформаций позволяет на основе установленных ранее корреляционных зависимостей оценить такие свойства как поствзрывные: проницаемость, скорость распространения колебаний, степень раскрытия образовавшихся трещин и т.д. Результаты таких оценок могут быть использованы в качестве исходных данных при моделировании целого ряда физических задач.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

- Архипов В.Н., Борисов В.А., Будков А.М. и др. Механическое действие ядерного взрыва. М. : Физматлит, 2002. – 384 с.
- Будков А.М., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. Оценка изменения проницаемости массива прочных горных пород в окрестности подземного взрыва по результатам численного моделирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 1. С. 12–22. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230102>
- Будков А.А., Кочарян Г.Г. Формирование зоны нарушенного материала в окрестности динамического сдвига по разлому в кристаллическом массиве горных пород // Физическая мезомеханика. 2024а. Т. 27. № 1. С. 102–116. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2024_27_1_102-116
- Будков А.А., Кочарян Г.Г. О влиянии разрушения отрывом на формирование зоны нарушенного материала в окрестности динамического сдвига по разлому в кристаллическом массиве горных пород // Динамические процессы в геосферах. 2024б. Т. 16. № 2. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_2_1
- Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М. : Наука. 1990. – 215 с.
- Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М. : ИКЦ «Академкнига». 2003. – 423 с.
- Perret W.R. Close-in Ground Motion from the MILROW and CANNIKIN Events // Bulletin of the Seismological Society of America. 1972.Vol. 62. <https://doi.org/10.1785/BSSA0620061489>

NUMERICAL SIMULATION OF MECHANICAL AND SEISMIC EFFECTS OF EXPLOSION AT GREAT DEPTH

© 2024 A. M. Budkov, G. G. Kocharyan*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: kocharyan.gg@idg.ras.ru*

The article presents the results of calculations of the mechanical and seismic effects of underground nuclear explosions carried out at a depth of more than a kilometer. A comparison is made of the modeling results, carried out taking into account the action of lithostatic pressure, with the data of recording the parameters of seismic explosion waves during known experiments on the island Amchitka (USA) «Cannikin» (explosion depth $H = 1791$ m) and «Milrow» ($H = 1219$ m). In addition, calculations were made of the maximum values of the relative coefficient of change in the permeability of the rock mass in the near zone of the explosion. It is shown that the methods used in the numerical modeling of the mechanical and seismic action of an explosion satisfactorily describe the parameters of seismic waves and the configuration of the zone of material destroyed by the explosion. At the same time, the calculation results do not provide quantitative information about the degree of damage to the massif and changes in its integral properties. However, the use of previously established correlation dependencies makes it possible to evaluate such properties as post-explosion permeability, seismic waves propagation velocities, apertures of fractures opening, etc. The results of such estimates can be used as input data when modeling a number of physical problems.

Keywords: underground explosion, numerical modeling, rock destruction, post-explosion permeability.